

УДК 621.039.57

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РИ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния качества сжатого воздуха, используемого для формирования плазменной струи в процессе плазменного резания стали с применением неактивного газа. В связи с широким распространением технологии плазменной резки в современном промышленном производстве указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятия. Результат исследования показал необходимость применения адсорбционных осушителей в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

**Ключевые слова:** плазменная резка, осушитель, сжатый воздух, влагосодержание, адсорбция, регенерация.

**Введение.** Сжатый воздух получает все большее распространение в промышленности как источник энергии, являясь одним из основных источников энергии на большинстве промышленных предприятий.

В настоящей публикации применение сжатого воздуха будет рассмотрено с позиции его непосредственного участия в технологическом процессе плазменной резки.

**Анализ последних исследований и литературы.** Обзор работ и исследований по поставленной тематике свидетельствует о том, что основное внимание разработчиков и производителей оборудования плазменной резки уделяется проблеме подбора параметров источника тока и разработкам, посвященным выбору материалов, используемых при производстве режущих сопел. При этом, проблеме очистки и осушки сжатого воздуха, используемого при создании плазменной струи уделяется недостаточно внимания, как в области теоретических исследований, так и на практике.

**Целью** данной статьи является изучение характера влияния параметров сжатого воздуха, используемого в процессе плазменной резки стали, в частности, такого параметра как влагосодержание, на качество реза, производимого плазменным оборудованием.

**Постановка проблемы.** В настоящей работе была рассмотрена проблема подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки, показана необходимость применения для этих целей осушителей адсорбционного типа, экспериментально была прослежена зависимость качества реза от влажности подводимого сжатого воздуха на аппарате плазменной резки, с техническими характеристиками, соответствующими условиям проведения эксперимента (см. табл. 1.), а также указаны основные требования, предъявляемые к адсорбционным осушителям, используемым для обеспечения воздухом аппаратов плазменной резки.

**Материалы исследований.** Качество работы аппарата плазменной резки можно оценить по таким параметрам как скорость и чистота реза, скос кромки реза, значение минимального размера точки входа.

Угол скоса кромки и размер точки входа являются определяющими при раскрое разрезаемой заготовки, позволяя значительно экономить обрабатываемый материал, особенно при большой (10 ... 40 мм) тол-

щине разрезаемой заготовки и вариантах раскроя с большим количеством «вложенных» деталей.

На практическом примере раскроя заготовок под фланцы согласно ГОСТ 12820-80 (стандарт распространяется на стальные приварные плоские фланцы для соединительных частей и трубопроводов, таким образом, можно справедливо считать данные изделия одними из наиболее распространенных, по меньшей мере, в котельном оборудовании) возможно проследить важность упомянутых параметров резания.

Так, при диаметре внутреннем фланца 1-125-10, равном 135 мм и диаметре внешнем фланца 1-25-10, равном 115 мм, расстояние между заготовками при симметричном позиционировании вложения составляет  $(135-115)/2=10$  мм. Если принять толщину реза равной 5 мм, то максимально допустимый скос кромки реза при раскрое листа толщиной (согласно ГОСТ 12820-80) 25 мм не может превышать  $6^\circ$ , поскольку в противном случае чистовая токарная обработка заготовок не перекроет зарезы, оставленные на заготовке плазменной струей (рис. 1).

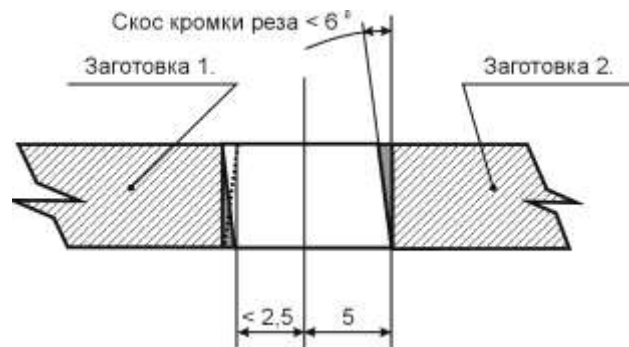


Рис. 1 – Скос кромки плазменного реза

Также следует учитывать, что точка входа плазменной струи превышает размерами толщину реза в 1,5 ... 2 раза, поэтому современные аппараты плазменной резки, как правило, не разрешают симметричное позиционирование вложения так, как описано в приведенном примере: учитывая необходимость врезки, программа-раскройщик принудительно смещает «вложенную» деталь, увеличивая, тем самым, расстояние между заготовками в точке врезки и, соответственно, сближая детали на 5 ... 10 мм по оси распо-

ложения врезки. Таким образом, при принятой ранее толщине реза, равной 5 мм, наклон плазменной струи не допускается вовсе, а скос кромки обрезаемой детали (даже принимая во внимание последующее снятие фасок в процессе чистовой токарной обработки заготовок) не должен превышать  $1^{\circ}$ .

Получить такие четкие характеристики плазменной резки на практике очень сложно, при этом следует учитывать все факторы, влияющие на качество реза, подбирать и четко выдерживать все параметры работы оборудования. И если выбор таких параметров, как напряжение и сила тока резания, может осуществляться персоналом в широких пределах и оперативно подстраиваться оборудованием автоматически, то качество воздуха возможно улучшить только лишь путем доукомплектования установки плазменной резки специальным оборудованием воздухоподготовки.

Таким образом, игнорирование требований к качеству воздуха и неиспользование оборудования его подготовки, в приведенном примере, может существенно увеличить затраты предприятия, увеличив отход материала и приведя к необходимости приобретения дополнительного материала специально под изготовление фланцев меньшего типоразмера.

Практическое же использование аппаратов плазменной резки в местных условиях эксплуатации свидетельствует о том, что проблеме подготовки воздуха уделяется недостаточно внимания.

При отработке технологии авторам приходилось сталкиваться с такими ситуациями, когда в шланге плазмореза наблюдалось накопление ливневой влаги. Такое обильное конденсирование жидкости сопровождается характерными звуками в сопле и приводит к резкому ухудшению качества реза, вплоть до срыва плазменной струи. Обслуживающий персонал отечественных предприятий научился бороться с указанной проблемой, применяя недорогие фильтры, в том числе изделия бытового назначения и конструкции собственного производства. Такие меры способны обеспечить принципиальную работоспособность резака, но лишь при условии его эксплуатации в летний период или в хорошо отапливаемом помещении, при этом вопрос о качестве реза вообще не ставится.

В тех случаях, когда предприятие эксплуатирует свое плазменное оборудование в штатных режимах, обращая внимание на качество выпускаемой продукции и стремясь реализовать все возможности оборудования плазменной резки в полном объеме, оно неизбежно приходит к выводу о невозможности качественно подготовить воздух с использованием исключительно фильтрующих технологий или рефрижераторных осушителей. Так, при выходе из сопла воздуха, подготовленного даже по 4 ... 5 классу загрязненности, неизбежно происходит образование влаги из-за разницы давления в сопле и последующего доохлаждения воздуха на его выходе. Практикой действительно подтверждается, что на выходе из сопла даже хорошо отфильтрованного воздуха будет образовываться влага.

Следует также отметить то, что качественная подготовка воздуха на несколько процентов повыша-

ет скорость резания. Это не является определяющим фактором, однако, при интенсивном использовании предприятием оборудования плазменной резки, способно принести ощутимый экономический эффект.

На необходимости применения осушителей, способных очищать воздух до 1 ... 2 классов загрязненности настаивают и производители аппаратов плазменной резки. Как пример, можно привести фрагмент публикации фирмы Thermal Dynamics о повышении срока службы расходных деталей в части, касающейся качества газов:

Производители часто рекомендуют использовать для плазменной резки "Сухой и Чистый" газ. Посторонние загрязняющие вещества могут снизить эффективность резки так как критически важные газовые каналы будут засорены. Эти каналы существуют в соплах и в "завихрителях газа" и они имеют одно из ключевых значений для рабочих характеристик плазменной системы.

Если подаваемый газ влажный или "мокрый", то это приводит к появлению загрязняющих веществ на поверхностях расходных деталей. Это вызвано тем, что вода под воздействием высокой температуры испаряется и оставляет отложения. Обычно Вы можете найти это на электроде и на внутренней поверхности сопла. Вред наносимый влагой в первоначальный момент, появляется на электроде в насечках для "завихрения" газа. В дальнейшем, при эксплуатации, электрод покрывается черным налетом и в конечном итоге производительность будет снижена. Когда это произойдет, расходные детали должны быть заменены.

Таким образом, можно сделать вывод, что износ указанных комплектующих частей ускоряется не только и не столько по причине низкой квалификации персонала или резки толстых листов металла с использованием интенсивных режимов, сколько из-за повышенной влажности плазмообразующего воздуха.

Однако, как было показано на конкретном примере раскроя заготовок для изготовления фланцев, основная функция устройства осушки воздуха – это не только и не столько снижение износа комплектующих, сколько кардинальное повышение качества реза, что дает, в ряде случаев, колоссальную экономию материала и значительный рост производительности режущего оборудования.

Учитывая вышесказанное, в процессе экспериментального исследования влияния влажности

сжатого воздуха на качество реза было принято решение об использовании в качестве устройства подготовки воздуха осушителя адсорбционного типа, способного обеспечить воздухоподготовку до 1 класса по DIN ISO 8573-1. При этом, с целью обеспечения возможности получения экспериментальных данных, адсорбер осушителя был укомплектован блоком управления ТДС-5, позволяющим варьировать влажность сжатого воздуха на входе в аппарат плазменной резки в пределах  $10,0 \dots 0,003 \text{ г/м}^3$ , что соответствует температуре точки росы в рамках от  $+10^{\circ} \text{ С}$  до  $-70^{\circ} \text{ С}$  и, соответственно, классам загрязненности от 6 до 1 (см. табл. 1.).

Таблица 1 – Влажосодержание согласно классов загрязненности

Класс очистки	Максимальное остаточное содержание влаги	
	г/м <sup>3</sup>	точка росы сжатого воздуха, °С
1	0,003	-70
2	0,117	-40
3	0,88	-20
4	5,953	+3
5	7,732	+7
6	9,356	+10

В качестве обрабатываемого материала был использован лист металла 1500 x 4000 x 16, сталь 3. Согласно раскрой (см. рис. 2.), было выполнено 159,2 м погонных реза с 442 точками врезки, при различных параметрах влажности подаваемого сжатого воздуха (см. табл. 2.).

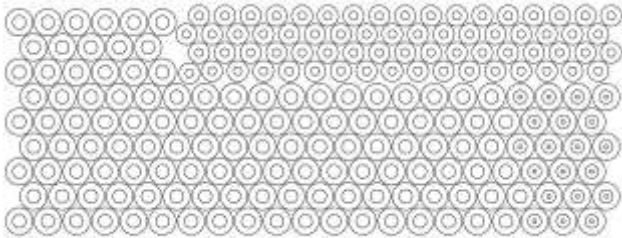
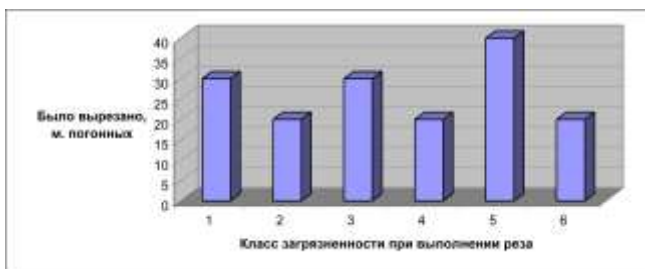


Рис. 2– Раскрой листа металла в ходе выполнения экспериментальной резки

Таблица 2 – Длины выполненных резов при заданном классе загрязненности



Прочие параметры резания были выбраны ПО оборудования автоматически и в ходе эксперимента не изменялись. Экспериментально проследить зависимость изменения скорости реза от параметров сжатого воздуха, по условиям проведения описываемого эксперимента, также технической возможности не представлялось.

**Результаты исследования.** В результате проведенного эксперимента была прослежена зависимость изменения угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха, отображенная на графике (см. рис. 3.).

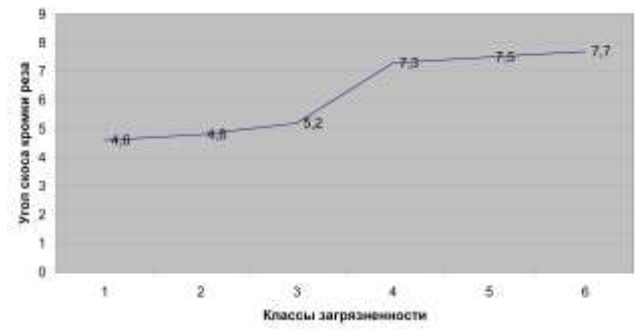


Рис. 3. Зависимость угла скоса кромки реза от класса загрязненности используемого воздуха.

Оценка зависимости угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха проводилась в процессе чистовой токарной обработки изделий. При этом, скос кромки определялся из значения максимальной конусности круглого реза, рассчитывавшегося, в свою очередь, как разность координаты положения касания резцом заготовки и положения резца, при котором на поверхности заготовки наблюдалось полное отсутствие следов плазменной резки (по условиям эксперимента вырезались детали цилиндрической формы, см. рис. 2.). Угол скоса кромки реза в градусах определялся по значению тангенса полученного соотношения хода резца к толщине разрезаемой заготовки (16 мм).

На приведенном графике зависимости угла скоса кромки реза от влажности используемого воздуха (см. рис. 3.) представлены усредненные значения полученных данных.

Заметное резкое повышение качества реза при переходе с 4 к 3 классу загрязненности, (см. рис. 3.) авторами объясняется как возможной погрешностью эксперимента, так и значительным изменением влажосодержания (с 5,953 до 0,88 г/м<sup>3</sup>) при снижении влажности с температуры точки росы +3 до -20<sup>0</sup> С.

В результате имеющегося опыта можно констатировать тенденцию повышения качества реза оборудованием плазменной резки при снижении влажности подаваемого сжатого воздуха и сделать вывод, что оборудование плазменной резки нуждается в воздухе с большей степенью очистки, чем та, которую способны обеспечить простые устройства воздухоподготовки типа циклонных очистителей и фильтров. К такому оборудованию относятся, как было показано выше, аппараты ручной и автоматической плазменной резки.

В указанных случаях требуется использование осушителей именно адсорбционного типа, способных обеспечить снижение точки росы до -70<sup>0</sup> С.

**Практические разработки.** Технология глубокой осушки воздуха с применением эффекта адсорбции влаги поверхностным слоем гранулированного мелкопористого адсорбирующего материала широко применяется в промышленности и по эффективности превосходит технологию доохлаждения осушаемого газа с использованием рефрижераторных охладите-



лей, способную обеспечить лишь 4-й класс загрязненности по остаточному содержанию влаги.

По принципу работы адсорбционные осушители подразделяются на установки, использующие принцип короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) и установки с горячей регенерацией адсорбента. Осушители, функционирующие по принципу короткоциклового безнагревной адсорбции, получили распространение как более простые, недорогие и надежные, в отличие от сложных и дорогих осушителей с горячей регенерацией.

Процесс глубокого осушения (до значения температуры точки росы  $-70^{\circ}\text{C}$ ) происходит с потерей энергии. Так, потери установок КБА составляют до 20 % осушаемого сжатого воздуха, а дорогостоящие установки с горячей регенерацией потребляют помимо сжатого воздуха и значительное количество электроэнергии, большая часть которой, фактически, расходуется на нагрев окружающей среды.

На рынке имеются различные типы устройств воздухоподготовки, причем применение дорогостоящих импортных устройств не гарантирует эффективного решения проблемы подготовки воздуха. Так, приобретение предприятием устройства воздухоподготовки даже зарекомендовавшей себя солидной марки не гарантирует эффективной работы данного устройства в конкретных условиях эксплуатации. Это вызвано прежде всего особенностями выходных параметров компрессорных станций, отличиями в конструкции отечественных воздухопроводов, недостаточно корректной эксплуатацией устройств воздухоподготовки и систем дренирования рабочим персоналом.

Особенностью эксплуатации устройств плазменной резки является непостоянство расхода сжатого воздуха, обусловленное необходимостью периодических отключений для установки разрезаемого листа и снятия готовых заготовок, существенным различием траекторий движения резака, толщиной обрабатываемых материалов и т. д. Поэтому вполне естественным является желание предприятий, эксплуатирующих плазменные резаки, снабдить свое оборудование осушителями, способными максимально гибко и оперативно подстраиваться под конкретные условия энергопотребления, обеспечивая в нужный момент времени требуемый расход воздуха на данном потребителе.

Учитывая указанное требование, авторами были разработаны и внедрены адсорбционные осушители типа ТДС, особенностью которых является то, что режим работы ТДС может изменяться встроенным активным измерителем влажности по оригинальному алгоритму, что позволяет как задавать требуемую глубину осушки (к примеру, от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  в летний период и от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$  в зимний), так и максимально быстро и без участия обслуживающего персонала реагировать на изменения расхода на потребителя сжатого воздуха. В случае временного прекращения потребления на выходе, осушитель ТДС автоматически переходит в режим задержки потребления, прекращая потерю сжатого воздуха на регенерацию, что значительно снижает непроизводительные потери сжатого воздуха.

Также к требованиям, предъявляемым к осушителям, снабжающим воздухом оборудование плазменной резки, можно отнести ограничения по габаритам и весу адсорбционных установок, что особенно актуально для случаев, когда установка плазменной резки представляет собой агрегат (тем более, мобильный), включающий в себя помимо непосредственно источника электрического тока, также и воздушный компрессор с устройствами воздухоподготовки.

К сожалению, в настоящее время в мировой практике неизвестны конструкции адсорбционных осушителей, позволяющие добиться заметного уменьшения габаритов и снижения веса изделия, по сравнению с осушителями общепринятой конструкции. Поскольку адсорберы, в большинстве случаев, представляют собой стационарное оборудование, вопрос о повышении мобильности этих устройств не являлся центральным в процессе рассмотрения путей совершенствования конструкции данного типа оборудования. Тем не менее, столкнувшись с необходимостью готовить качественный воздух для мобильных потребителей, в частности, передвижных устройств плазменной резки, авторами были намечены пути повышения интенсивности работы адсорбционных осушителей при сохранении их массо-габаритных характеристик.

Адсорбционный осушитель, независимо от типа регенерации, функционирует циклически, при этом процесс включает в себя как этап собственно адсорбции (рабочий), так и этап регенерации адсорбирующего вещества (вспомогательный), эффективность которого оказывает значительное влияние на производительность адсорбционного осушителя. В практике постройки адсорбционных осушителей используются методы удаления влаги из адсорбента (просушки) путем обдува его предварительно нагретым, либо предварительно осушенным воздухом. При этом энергия, необходимая для осуществления процесса регенерации тратится на повышение влагоёмкости продувочного воздуха и, практически, технологически ограничена и не может быть значительно увеличена с целью интенсификации процесса регенерации.

Таким образом, с целью повышения эффективности работы адсорбционных осушителей, снижения их веса и уменьшения размеров, в том числе, для использования в мобильных агрегатах, потребовалось увеличить интенсивность регенерации заданного объема адсорбирующего вещества путем внесения дополнительных видов энергии на этапе регенерации. Работы в этом направлении носят экспериментальный характер и осушители компактной конструкции в настоящее время на отечественных производственных предприятиях не внедряются.

Еще одним требованием, предъявляемым оборудованием плазменной резки с ЧПУ, является повышенная надежность оборудования воздухоподготовки, что вызвано невозможностью программы повторного стартовать и продолжить рез с координаты аварийной остановки сопла. Таким образом, аварийная остановка приводит к неизбежной порче заготовки и необходимости приобретения дополнительной партии обрабатываемого материала.

В целях повышения надежности производимых осушителей ТДС, авторами был разработан и внедрен комплекс мер по обеспечению безотказности конструкции, включая снижение чувствительности осушителя к несоответствию входных параметров воздуха и электропитания необходимым и к случаям некорректного обслуживания оборудования персоналом. Также в конструкции осушителей ТДС был впервые использован принцип полистабильности управляющей системы с применением кватростабильного электропневмодрайвера, физически исключая такое положение арматуры осушителя, при котором потребление на осушителя может быть прекращено, даже в случае отключения осушителя от источника электропитания.

Таблица 3 – Параметры установки плазменной резки, использованной при проведении эксперимента

Параметр	Значение
Перемещение сопла max, мм	
-продольное	6080
-поперечное	1520
Пределы подач, мм	
-продольный	0 ... 6500
-поперечный	0 ... 6500
Размер заготовки max, мм	1500 ... 6000
Точность поверхности по ГОСТ 14792-80	2 – 3 кл.
Точность позиционирования, мм	0,1
Размер выреза, min	10
Точность воспроизведения контура по ГОСТ 5614-74	+/- 0,35
Источник плазмы	Инверторный 140 А. Режим ПВ 100 %
Толщина max разрезаемой заготовки, мм	35
Тип разрезаемого материала: углеродистые, легированные и специальные стали, в т. ч. нержавеющие, цветные металлы.	

**Выводы.** Процесс плазменной резки получает все более широкое распространение и интенсивно

внедряется на машиностроительных предприятиях, заменяя собой механическое резание, по причине множества явных и неоспоримых преимуществ, таких, как возможность резания деталей со сложной геометрической формой, высокое качество поверхности реза, невысокая температура нагрева разрезаемой заготовки, исключая деформацию заготовки и закалку кромки реза, безопасность процесса резания, высокая скорость резания, возможность обработки любых металлов, в том числе цветных и тугоплавких, сравнительная легкость автоматизации процесса резания. При этом установлено, что плазменное оборудование предъявляет ряд специфических требований, в том числе, к качеству сжатого воздуха, используемого для получения плазменной струи и, соответственно, к оборудованию воздухоподготовки, анализу которых и посвящена настоящая статья. Результат приведенного исследования показал необходимость применения осушителей адсорбционного типа в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

**Список литературы:** 1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31. 2. Быховский Д. Г. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 2001. С. 83. 3. Ширшов И. Г., Котиков В. Н. Плазменная резка. М.: Машиностроение, 1987. С. 198. 4. Мельгунов, М.С. Короткоцикловая безнагревная адсорбция / М.С. Мельгунов // Промышленный катализ в лекциях / под общ. ред. А.С. Носкова. – М.: 2009. – Вып. 8. – С. 62–105.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dobrotvorskiy P.P., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennykh usloviyah. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print. 2. Plazmennaya rezka metalla [WWW resource]. URL: <http://плазмарез.рф/?p=70> (Date of visit site: 28.09.2015). 3. Thermal Dynamics Operator's Ready Reference [WWW resource]. URL: [http://www.thermal-dynamicP.com/literature/operators\\_reference/63-2823.pdf](http://www.thermal-dynamicP.com/literature/operators_reference/63-2823.pdf) (Date of visit site: 28.09.2015).

Поступила (received) 12.10.2015

**Добротворский Сергей Семенович** – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [sdobro@mail.ru](mailto:sdobro@mail.ru);

**Dobrotvorskiy Serhei Semenovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: [sdobro@mail.ru](mailto:sdobro@mail.ru);

**Алексенко Борис Александрович** – аспирант НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: [commerage@list.ru](mailto:commerage@list.ru);

**Aleksenko Borys Aleksandrovich** – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: [commerage@list.ru](mailto:commerage@list.ru);

**Добровольская Людмила Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25.

**Dobrovolskaia Liudmyla Heorhyevna** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.